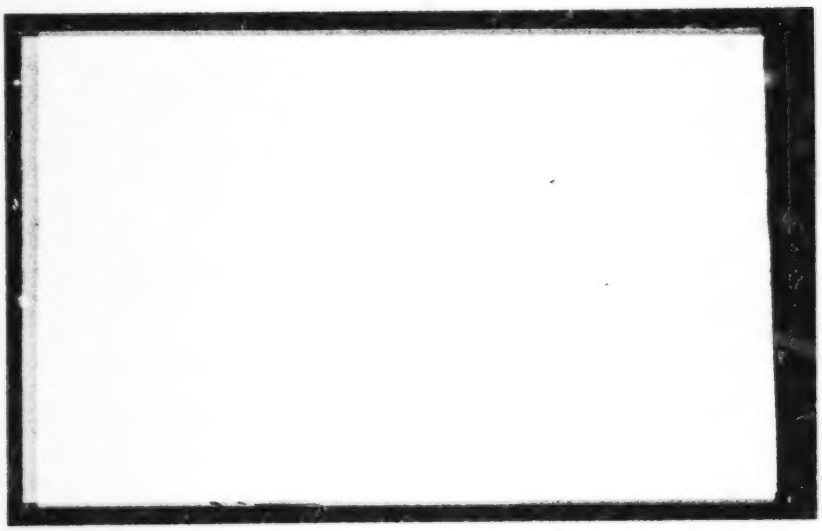
UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL



CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS

CASE POSTALE 6128, SUCCURSALE A, MONTRÉAL, QUÉBEC, H3C 3J7

PLANIFICATION TACTIQUE POUR LE TRANSPORT FERROVIAIRE DES MARCHANDISES

par

Teodor-Gabriel Crainic

Présenté au congrès de l'Association québécoise du transport et des routes (A.Q.T.R.), Sherbrooke, mars 1984.

Ce rapport a été publié grâce à une subvention du fonds F.C.A.C. pour l'aide et le soutien à la recherche.

Université de Montréal

Centre de recherche sur les transports - Publication #331

Janvier 1984

Dépôt légal - 1er trimestre 1984

RÉSUMÉ

Nous examinons les principales composantes du processus de planification tactique du transport des marchandises dans le cadre d'une compagnie de chemin de fer, pour en dégager les caractéristiques, les interrelations, ainsi que les compromis qui doivent être réalisés lors de la prise de décision. Nous décrivons ensuite un modèle d'optimisation de réseau qui peut aider le processus de planification, ainsi qu'un aperçu des méthodes de résolution utilisées et des résultats obtenus. Nous concluons avec une discussion des modalités d'intégration du modèle dans le processus de planification.

INTRODUCTION

Le transport ferroviaire des marchandises revêt une très grande importance dans un pays aux dimensions du Canada et il est nécessaire qu'il soit efficace, aussi bien au niveau des coûts qu'au niveau de la fiabilité et de la qualité du service. Ceci est encore plus vrai dans le contexte actuel de hauts prix d'énergie, coûts élevés de main d'oeuvre, hauts coûts d'acquisition et d'utilisation de l'infrastructure et de l'équipement roulant. Sans oublier ni la concurrence que d'autres modes et, en particulier, le camion, livrent au train, ni le contexte très compétitif des marchés, tant interne qu'externe, dans lesquels les produits d'ici doivent évoluer, là où le coût et la qualité du service de transport influencent grandement leur prix et aussi leur succès.

L'amélioration constante des techniques de planification du développement et de l'utilisation du réseau ferroviaire constitue un des principaux moyens d'assurer cette efficacité et cette qualité et la programmation mathématique peut y contribuer par de précieux outils.

C'est le but de cet article que de présenter les grandes lignes d'un tel outil, pour un des domaines privilégiés de la collaboration planification des chemins de fer - techniques de programmation mathématique : la planification tactique (à moyen terme) des opérations. Le but de la planification tactique est une affectation et une utilisation rationnelles,a efficaces et économiques des ressources existantes en vue d'offrir un service de qualité. Le processus est concerné principalement par le type des services de train à utiliser, leurs routes et fréquences, la détermination des classes de trafic à desservir par les divers services, l'établissement des politiques de classification des wagons et de formation des trains dans les gares du réseau.

Cet article débute par une présentation des étapes du transport ferroviaire des marchandises et des principaux problèmes de planification qui leur sont associés. Les relations entre ces problèmes et les compromis à réaliser lors de la prise de décision sont ensuite examinés, en insistant sur le niveau tactique de planification. C'est dans ce contexte que nous présentons un modèle d'optimisation de réseau comme outil d'aide au processus de planification. Nous présentons aussi, schématiquement, l'algorithme développé pour ce modèle, ainsi que quelques résultats obtenus sur un problème réel. L'article s'achève sur une discussion des modalités d'intégration du modèle dans le processus de planification, ainsi que de quelques généralisations possibles.

LE PROCESSUS ET LES DÉCISIONS DE PLANIFICATION

Le trafic des marchandises dans un système ferroviaire est le mieux décrit en termes de réseau. Pour un tel système, les noeuds du réseau représentent les gares de triage, les points de jonction, les points de livraison/ramassage des wagons, tandis que les arcs représentent les voies de chemin de fer reliant ces stations. La grande taille des réseaux ferroviaires (surtout ceux du Canada) pose des problèmes particuliers de modélisation, surtout lorsqu'une plus forte agrégation est nécessaire comme, par exemple, lors de la planification à moyen terme.

Dans un tel réseau, le trafic se représente sur les arcs par des mouvements de trains et de wagons, tandis qu'aux noeuds, il subit diverses opérations. On classe alors les activités et les décisions en <u>opérations de noeud</u> se déroulant dans les gares et en <u>opérations de ligne</u> se déroulant sur les voies.

Voici maintenant, très sommairement, les étapes du transport des marchandises par chemin de fer.

Le processus débute par une commande de wagons vides de la part du client. À la gare, les wagons sont sélectionnés, vérifiés et ensuite livrés au point de chargement. Une fois chargés, ils sont transportés à la gare de triage d'origine où les wagons sont classifiés et réunis dans un bloc avec d'autres wagons ayant la même destination de classification.

Le bloc est ensuite placé dans un train et à ce moment le voyage commence. Pendant ce voyage, sur les voies, le train peut dépasser ou être dépassé par d'autres trains. Si la voie est simple, le train peut également rencontrer un train circulant en sens inverse. Lors de tels événements, le train dont la priorité (et la vitesse) est la plus basse doit attendre sur une voie d'évitement que la voie soit à nouveau libre. Pendant ce même voyage, mais dans les gares cette fois, les wagons sont périodiquement vérifiés et peuvent, avec leur bloc, être changés de train par une opération de transfert. Lorsque le bloc est arrivé à sa destination (la destination de classification des wagons le composant), il est défait et les wagons dont ce n'est pas la destination finale sont reclassifiés. Les autres sont transportés au point de déchargement, sont déchargés et ensuite préparés (nettoyés, vérifiés, etc.) pour un nouveau cycle ou pour un retour à vide vers la gare d'origine ou vers une autre gare selon la demande.

Regardons maintenant les opérations dans une gare de triage. Un train qui y arrive pour classification est d'abord introduit dans une zone d'accueil où la locomotive est enlevée, les wagons sont vérifiés et les blocs sont séparés. Les wagons sont ensuite dirigés vers les voies de classification, chaque wagon étant placé sur la voie qui correspond à sa destination de classification avec d'autres wagons ayant cette même destination de classification. Selon la technologie utilisée lors de cette opération, les gares de triage se divisent en deux catégories : les gares de type plat ("flat yard"), où la classification s'effectue à l'aide d'une locomotive de

triage et les gares à bosse ("hump yard"), où les wagons sont montés sur une élévation de terrain et, pendant leur descente, ils sont aiguillés vers la voie assignée. Les wagons ainsi triés sont réunis en blocs. Les blocs attendent ensuite dans la zone de départ pour être réunis en trains. Après une derniere vérification de tout le train, le voyage peut commencer.

Évidemment, ce ne sont pas tous les trains qui sont ainsi classifiés. Un train peut arrêter pour changer d'équipage, être vérifié, être ravitaillé ou encore pour laisser des blocs (qui seront transférés à un autre train ou qui, arrivant à destination, seront reclassifiés) et/ou en prendre. Ainsi, l'activité totale et le volume de wagons traités par une gare dépassent ceux de la seule opération de classification. Il est important de noter que, dans le contexte du transport ferroviaire des marchandises, les opérations se déroulant dans les gares occupent une place particulière, du au fait que les wagons y passent la majeure partie de leur cycle (temps dans les gares et sur les voies).

Examinons maintenant un peu plus systématiquement ces opérations et les décisions les concernant.

Une des principales décisions de ligne est la sélection des routes (ou design du réseau de service). Il s'agit de déterminer quels chemins du réseau seront pourvus d'un service de train et quelle sera la fréquence du service. Il faut aussi déterminer le type de service (local - arrêtant à toutes les stations, direct - pas d'arrêt intermédiaire, etc.), ainsi que d'autres caractéristiques telles sa vitesse et sa priorité. Commun au divers modes de transport, tant au transport des marchandises qu'à celui des personnes, ce problème est considéré comme étant plus compliqué lorsqu'il s'agit du transport ferroviaire des marchandises, à cause de la complexité

accrue de ses relations avec les autres activités, spécialement le cheminement du trafic et les opérations de gare.

Si la sélection des routes fixe le flot de trains, le cheminement du trafic fixe le flot de wagons. Pour chaque classe de marchandises, et pour chaque paire origine/destination donnée, il faut ainsi spécifier la suite de services de train empruntée, ainsi que les opérations subies aux différentes gares sur le chemin. En déterminant une structure de cheminement pour toutes les classes de trafic, on détermine le flot de wagons sur chaque lien et à travers chaque noeud du réseau et donc le niveau minimum de service nécessaire sur chaque voie, ainsi que la quantité de travail à effectuer à chaque gare.

Dans le transport ferroviaire, la force motrice est indépendante des unités à transporter et il faut donc s'assurer d'une distribution des locomotives parmi les mouvements des trains de telle manière que la disponibilité de la force de traction pour chaque train soit assurée et qu'on obtienne un haut taux d'utilisation des unités motrices. C'est un problème très complexe et il est généralement traité séparément (voir Florian et coll. 1976).

Le mouvement du trafic cause bien souvent un débalancement dans la distribution des wagons vides et il faut donc prévoir un trafic de wagons vides pour en assurer la disponibilité. Une des principales méthodes utilisées dans ce cas consiste dans la prévision du trafic de wagons vides à effectuer entre les gares du réseau (par un modèle de gravité (Coutu, 1978), par exemple) et l'incorporation subséquente de ces prévisions, sous forme de demande de trafic, dans le problème de cheminement du trafic.

Une fois choisies les routes des trains et leurs fréquences, ainsi que le cheminement du trafic, un horaire spécifiant les mouvements des trains peut être construit. Pour chaque train, l'horaire précise l'heure d'arrivée et l'heure de départ pour chaque gare sur sa route. L'horaire peut être rigide (tels les horaires des trains de passagers ou du service "accéléré" de la SNCF, par exemple) ou indicatif. Il peut aussi, bien entendu, ne pas exister du tout.

Remarquons que toutes les activités que nous venons de mentionner sont aussi appelées activités de réseau, car les décisions les concernant affectent tous les éléments du réseau.

Mentionnons enfin les règles de priorité sur les voies. Dû à la capacité limitée des voies de chemin de fer, spécialement dans le cas des voies simples, un certain nombre de rencontres et de dépassements ont lieu entre les trains. Il faut donc fixer un ensemble de règles pour définir les droits de passage et ainsi régir la circulation.

Premières en importance parmi les activités de noeud, les politiques de classification (ou regroupement ou blocage) déterminent essentiellement, à chaque gare, les groupes selon lesquels les wagons seront triés en vue de la formation des blocs pour les mouvements ultérieurs. L'établissement de ces politiques constitue un problème particulièrement complexe dans le cas du transport ferroviaire, surtout lorsque regardé au niveau de tout le réseau.

Des politiques efficaces de classification doivent, bien sûr, minimiser les coûts d'opération. Mais, tout aussi important, elles doivent

également écourter les délais encourus dans les gares et assurer une utilisation intelligente des ressources, pour ainsi éviter la congestion et engendrer une répartition équilibrée du travail de classification parmi les gares du réseau. Ainsi, ces politiques sont fortement reliées à celles de formation de trains, ainsi qu'aux stratégies de cheminement et de sélection des routes.

Sous le nom de politiques de formation, on classe les règles utilisées pour décider quels groupes de trafic doivent être mis sur chaque train. Cela revient à déterminer, pour chaque service, et à chaque gare-arrêt intermédiaire sur sa route, la liste spécifiant quels blocs il peut prendre. Nous avons déjà indiqué la forte interaction entre ces politiques et les autres activités de réseau et nous n'y insisterons donc pas d'avantage à ce moment.

D'autres règles à établir dans une gare de triage concernent les politiques d'accueil régissant le système des priorités des files d'attente à l'entrée de l'opération de classification.

Les politiques de dispatching, enfin, constituent un ensemble de règles qui, dans un cadre hautement dynamique, assurent la bonne marche journalière de la gare : allocation des lignes de triage, ordonnancement des blocs sur les voies, modifications dynamiques de l'horaire des trains selon l'état du trafic, etc.

Lorsque ces décisions sont remises à leur place habituelle dans le processus de planification, c'est une structure à deux dimensions qui se dégage pour définir les relations et compromis entre les activités.

La première dimension, verticale ou hiérarchique, classe les décisions selon des critères tels l'horizon de planification, les investissements nécessaires et le niveau d'administration impliqué. En utilisant les dénominations d'Assad (1980b), voici la classification hiérarchique des décisions :

Niveau stratégique

A ce niveau, on rencontre les décisions à prendre à un haut niveau d'administration, impliquant des horizons de planification étendus et des investissements majeurs de capital, dont :

- design et amélioration du réseau, abandon des voies;
- emplacement des gares de triage et/ou d'équipement dans les grandes gares;
- acquisition des ressources (locomotives, wagons, etc.).

Le modèle d'amélioration du réseau de LeBlanc (1976) est un exemple de modèle de programmation mathématique pour un problème de niveau stratégique.

Niveau tactique

Les décisions prises à ce niveau concernent plus spécialement l'allocation rationnelle et efficace des ressources sur un horizon moyen de planification, avec, comme objectif, l'amélioration des performances de tout le réseau :

- sélection des services et des fréquences;
- cheminement du trafic;
- politiques de formation des trains et décisions sur leur longueur;
- politiques de classification et allocation du travail de classification parmi les gares de triage.

Niveau opérationnel

Il s'agit de décisions concernant les opérations au jour le jour, au niveau local, dans un environnement dynamique où le facteur "temps" joue un rôle important et où un grand souci du détail est nécessaire :

- horaires des trains;
- horaires des activités d'entretien et de réparation des voies et du matériel;
- règles de priorité sur les voies;
- mouvement des locomotives;
- mouvement des wagons vides;
- politiques d'accueil et de dispatching.

Remarquons que les catégories ne sont pas étanches. Ainsi, certains aspects des problèmes de classification et de formation peuvent être classés comme opérationnels lorsque regardés selon l'organisation interne des gares de triage, tandis que le mouvement des wagons vides devient un problème tactique lorsqu'examiné au niveau de tout le réseau. Tout est en fait fonction du niveau d'agrégation des données et de la longueur de l'horizon de planification qu'on demande pour les politiques en résultant.

Les différences entre les niveaux sont cependant évidentes, tout comme les relations entre eux : à chaque niveau, les décisions suivent les grandes lignes développées au niveau supérieur, tout en se basant sur les résultats obtenus au niveau inférieur.

Remarquons finalement que c'est cette hiérarchie des décisions qui empêche la construction d'un modèle unique pour tout le processus de planification. En conséquence, les modèles qu'on bâtit suivent cette hiérarchie et s'adressent à un niveau et/ou à un problème spécifique.

En examinant les problèmes du niveau tactique, on observe la deuxième dimension, qu'on peut définir comme horizontale, de la structure des relations mentionnée plus haut.

Ainsi, on observe que toutes ces opérations et les décisions les concernant sont fortement interreliées, tant dans leurs aspects spacio-temporels que dans leurs aspects économiques.

Deux exemples extrêmes illustrent assez bien ces relations. Dans un premier cas, on adopte une politique de classification qui trie les wagons à chaque gare en deux groupes : un pour la gare suivante sur la ligne (et ses satellites) et un autre contenant les wagons destinés aux autres gares et qui seront reclassifiés à la gare suivante. Associés à cette politique, on trouve des services de trains locaux, arrêtant à toutes les gares ou faisant la navette entre deux gares adjacentes. Cette option amène, entre autres, des coûts bas d'opération des trains, mais augmente substantiellement les délais dûs à la congestion dans les gares et aux fréquents changements de trains et fait donc décroître la qualité du service. D'un autre côté, on peut envisager de transporter tout le trafic par train direct entre l'origine et la destination, éliminant ainsi toute opération de reclassification. Une telle politique peut diminuer les délais et les coûts de manutention dans les gares, mais augmente les coûts d'opération des trains ainsi que la congestion sur les voies. Entre ces deux extrêmes, un très grand nombre de variantes et de combinaisons sont possibles, chacune avec ses avantages et ses inconvénients.

Ce qui ressort clairement, c'est qu'au niveau tactique en particulier, les décisions prises sur un ensemble de politiques influencent directement les décisions à prendre sur un autre ensemble. De plus, il y a souvent des compromis à envisager entre les coûts d'opération et les coûts de

délais ou, plus généralement, la qualité du service, tant au niveau d'un même ensemble qu'au niveau de plusieurs opérations, différentes, mais en étroite relation les unes avec les autres. Sans oublier que l'impact de ces décisions se répercute sur tout le réseau, ce qui en complique encore l'évaluation.

C'est dans ce contexte qu'un modèle d'optimisation s'avère un excellent outil d'aide à la planification. En général, étant donné un critère de performance (fonction objectif), ce type de modèle offre la possibilité d'une analyse méthodique des relations et compromis à l'intérieur du critère, ainsi que la génération et l'évaluation systématiques et relativement rapides d'un très grand nombre de stratégies d'opération possibles. Il permet ainsi de déterminer la ou les meilleures stratégies par rapport au critère de performance indiqué.

Nous présentons donc maintenant un modèle d'optimisation du réseau qui intègre les problèmes du niveau tactique et, tout en tenant compte des caractéristiques et des contraintes physiques du réseau, génère un ensemble de stratégies d'opération pour ces activités telles qu'on atteint le double objectif d'offrir le meilleur service possible (en termes de délais...) au meilleur coût possible.

LE MODÈLE

Dans la littérature, on retrouve un nombre important de modèles, tant d'optimisation que de simulation, dédiés aux divers aspects du transport ferroviaire des marchandises. A ce sujet, le lecteur intéressé pourra consulter la revue d'Assad (1980a).

Ce nombre est beaucoup plus réduit cependant lorsqu'on considère uniquement les modèles de réseau s'adressant aux problèmes de la planification tactique. Mentionnons :

. Les travaux de Thomet (1971a,b), qui introduit la notion de "coûts de l'usager" associés essentiellement aux délais encourus pendant le processus de transport et qui cherche, en minimisant un coût total de transport (opération + "coûts de l'usager"), à atteindre un équilibre entre ces coûts de service et les coûts d'opération.

. Le "Railcar Network Model", développé par Petersen et coll. (1975), a pour but de trouver le cheminement optimal pour minimiser le délai total (en nombre de wagons-heures), définit comme la somme des délais sur les voies et dans les gares tels que calculés par un ensemble de sous-modèles analysant les activités de ligne et de gare de triage selon un ensemble de caractéristiques physiques, technologiques et de comportement.

. Le modèle de Bodin et coll. (1980), qui veut déterminer une stratégie globale de classification pour minimiser le coût total d'opération et de délai sur tout le réseau, tout en tenant compte des contraintes particulières de la compagnie.

. Le "General Rail Network Model" d'Assad (1980b) traite principalement les problèmes de sélection des routes et de formation des trains. Son but principal est de réduire les délais et la congestion due aux activités dans les gares de triage par l'introduction de trains directs n'arrêtant donc pas aux gares intermédiaires sur leur chemin.

Tous ces travaux représentent des étapes importantes dans le développement de la modélisation du transport ferroviaire des marchandises et

notre modèle s'inscrit dans cette lignée. Nous croyons cependant qu'il est plus général, plus complet et plus versatile que ses prédécesseurs.

Pour une description détaillée du modèle, nous référrons le lecteur à Crainic (1982) et à Crainic et coll. (1984a). Dans ce qui suit, nous faisons seulement une succinte présentation du cadre général de modélisation.

Le réseau physique est représenté par un graphe orienté $G_{ph}=(N,A_{ph})$, où les noeuds dans N représentent des gares de triage (ou une agrégation de gares de triage), tandis que les arcs dans A_{ph} symbolisent les voies de chemin de fer entre ces gares. Sur ce réseau, la demande de transport est définie pour chaque marché = (origine, destination, classe de marchandise) pour lequel un nombre non-nul d^m de wagons (ou une mesure équivalente de tonnage) doivent être transportés. Il y a M marchés.

Sur le réseau physique, on spécifie une structure de services, G = (N, A) où a_e A définit un service de train réalisable avec une origine, une destination et des arrêts intermédiaires (le cas échéant) dans N, une route dans G_{ph}, et dont le type (vitesse-priorité) est spécifié. Sa fréquence t_e, par contre, constitue une des variables du modèle dont la valeur est à déterminer. Il y a S services.

Pour un marché m donné, un itinéraire k représente un cheminement réalisable pour le trafic du marché et est défini par la séquence de services de train empruntée dans G et par la suite de points de reclassification sur sa route. La quantité de trafic x_k^m du marché m expédié sur l'itinéraire k est aussi une variable de décision dont la valeur est à déterminer. Pour chaque marché, il y a I^m itinéraires.

Le modèle s'écrit alors :

$$\text{Minimiser} : \sum_{m=1}^{M} \sum_{k=1}^{I^m} Z_k^m (X,T) + \sum_{e=1}^{S} [Y_e(T) + P_e(X,T)]$$

$$\text{sujet à} \quad \sum_{k=1}^{I^m} x_k^m = d^m \qquad 1 \leq m \leq M$$

$$x_k^m \geq 0 \qquad 1 \leq k \leq I^m, \; 1 \leq m \leq M$$

$$t_e > 0 \text{ et entier} \qquad 1 \leq e \leq s$$

où $T = (t_1, t_2, \ldots, t_S)$

$X = (x_1^1, x_2^1, \ldots x_{I^m}^M)$

Z_k^m = le coût d'opération et de délai pour l'itinéraire k du marché m

Y_e = le coût, opération et délai, associé au service a_e

P_e = le coût de pénalité pour dépassement de capacité sur un ou plusieurs segments du service a_e

C'est dans l'objectif que vont se refléter les relations et compromis entre les activités, leurs coûts d'opération et leurs influences sur le niveau de service. Ces dernières sont mesurées par des délais que chaque opération fait subir aux flots de wagons et/ou de trains. Ces délais, à leur tour, sont convertis en unités de coûts via des "coûts unitaires de délais" définis pour chaque classe de marchandise et chaque type de service de train.

Voici maintenant, très brièvement, les principaux éléments de la fonction objectif :

. Délai de classification (wagons) : par des modèles de file d'attente (Petersen, 1977a,b; Turnquist et Daskin, 1981) liant le délai moyen dans la gare aux caractéristiques de la gare (représentées par un temps moyen de service) et à la congestion dans la gare. Un terme correctif tenant compte de la destination du bloc (par une pénalité sur la taille des petits blocs, par exemple) est aussi inclus.

. Coûts de manipulation des wagons et des trains dans les gares et sur les voies.

. Délai de parcours sur les voies (wagons et trains) : par des modèles (Elbrond, 1978; English, 1977; Hanks et coll., 1974, etc.) liant le délai moyen subi sur un segment de voie aux caractéristiques physiques du lien, au type de service et à la congestion sur la voie.

. Délai de fréquence représentant l'attente des wagons dans la gare pour qu'un train soit disponible. C'est un terme important comme mesure de la qualité du service et comme un des facteurs déterminant la longueur des convois à utiliser.

Il faut remarquer que cette formulation permet de tenir compte d'éventuels cas particuliers à la compagnie. On peut ainsi, par exemple, préspécifier des cheminements, ou des routes de trains, ou encore des fréquences. Des contraintes additionnelles, concernant, par exemple, le nombre maximum de blocs ou de trains à former dans certaines gares, peuvent également être introduites, que ce soit explicitement comme contraintes, ou implicitement dans l'objectif.

Soulignons aussi que le modèle cherche une solution globale, à un niveau agrégé, adéquat pour le niveau tactique de planification. Ainsi, les variables t_e indiquent quels services de train seront retenus et le niveau de service à offrir. Les variables x_k^m, quant à elles, indiquent directement le cheminement pour chaque marché. De plus, à partir du cheminement, on connaît, à chaque gare, la charge totale de travail, ainsi que les grandes lignes des politiques de classification (on connaît les blocs à former et les marchés d'où proviennent les wagons qui les composent) et de formation (on connaît pour chaque train les blocs qui le composent).

Remarquons finalement qu'il s'agit d'une formulation très souple, permettant d'y inclure divers modèles pour les activités individuelles, ce qui facilite son adaptation et son intégration au processus de planification.

RÉSOLUTION

Algorithmiquement, le modèle se présente comme un problème de multiflot non-linéaire mixte de grande taille mais structuré de façon très favorable à la résolution :

- absence, au niveau des contraintes, de toute relation entre les marchés et les services;
- les contraintes de distribution du trafic pour chaque marché sont linéairement indépendantes et forment une matrice bloc-diagonale avec une contrainte par bloc;
- toutes les relations entre les marchés et les services se concentrent au niveau de l'objectif.

Ceci nous a permis de développer un algorithme basé sur des techniques efficaces de décomposition et dont la description schématique suit. Pour une description détaillée de l'algorithme et de ses performances, voir Crainic (1984b).

L'algorithme travaille alternativement sur les sous-problèmes suivants :

. Étant donné la distribution du trafic de chaque marché parmi ses itinéraires, modifier les fréquences de service pour améliorer (si possible; sinon, arrêter) la valeur de l'objectif. Les fréquences à modifier sont déterminées par des calculs de différences finies.

. Compte tenu du niveau de service offert, établir une distribution optimale du trafic. Le problème est résolu en appliquant un algorithme de décomposition qui parcourt de façon cyclique l'ensemble des marchés, chaque sous-problème (i.e. un marché) étant résolu en maintenant fixes les valeurs des variables des autres marchés. Pour chaque sous-problème, un nouvel itinéraire est d'abord généré, suivant quoi, la distribution du trafic est réoptimisée par des algorithmes de descente.

Cette méthode, modèle et algorithme, a été et est couramment expérimentée sur des données provenant du Canadien National (C.N.) et de très bons résultats ont été obtenus dans des temps de résolution relativement courts.

Voici, à titre d'exemple, quelques résultats d'une telle expérimentation (Crainic, 1984a) conduite sur le système CDC Cyber 173 de l'Université de Montréal. Les données représentent des prévisions de trafic pour la partie ouest du réseau du C.N. pour l'année 1990.

Après agrégation, on obtient un réseau physique de 107 noeuds, 95 liens et 2613 marchés, dont les 735 plus gros représentent, à eux seuls, plus de 95% de la demande totale.

Pour le réseau de service, en plus des trains de passagers prévus à l'horaire, nous avons utilisé les services obtenus, pour les mêmes données, par CANAT, le système informatique de simulation-traitement de données du C.N. Ce réseau est composé de 415 liens de service provenant de 14 services rapides (haute priorité) et de 177 services normaux.

L'expérience consistait à prendre la solution de CANAT comme base et à chercher à l'améliorer marginalement. Pour cela, on effectue d'abord l'affectation optimale du trafic en utilisant le niveau de service obtenu par CANAT. Ce niveau est ensuite modifié légèrement (toutes les fréquences sont augmentées de cinq unités) et le problème résultant est résolu. Le tableau 1 contient quelques statistiques relatives à cette expérience. Le tableau 2 montre, quant à lui, l'amélioration significative obtenue dans les valeurs de certains critères de performance, surtout ceux reliés au réseau de service, après la résolution du problème modifié. Quant aux temps de résolution, ils sont très intéressants, compte tenu de la taille et de la complexité du problème. Il faut aussi noter que d'autres expérimentations, utilisant des réseaux de service différents, ont fourni des résultats équivalents.

	Affectation CANAT	Optimisation
temps total résolution sec. C.P.U.	480	724
nombre de services rapides	14	11
nombre de services normaux	177	121
total	191	132
nombre total de trains rapides	105	122
nombre total de trains normaux	1178	807
total	1285	927
nombre total d'itinéraires utilisés	1274	842
pourcentage de marchés utilisant un seul itinéraire	66,4%0	89,7%

Tableau 1 : Quelques statistiques de l'expérimentation

	diminution en %
tonnes-miles	0,33
wagons-miles	0,28
trains-miles	10,26
coûts de train :	
délais	8,66
opération	7,72
total	7,93
coûts de wagon :	
délais	3,24
opération	0,49
total	0,93
COÛT TOTAL	4,12

Tableau 2 : Amélioration des valeurs de certains critères de performance après optimisation

REMARQUES ET COMMENTAIRES

Remarquons d'abord la modularité de l'algorithme, parallèle à celle du modèle. Cela permet, d'une part, de modifier, le cas échéant, les algorithmes suivant les modifications du modèle et, d'autre part, d'utiliser seulement une partie de l'algorithme pour effectuer des études spécifiques, telle l'optimisation du trafic d'un ensemble de marchés ou l'étude de la longueur optimale des convois sur un service particulier. Ceci est facilité par l'efficacité des procédures individuelles composant l'algorithme, efficacité que nous avons pu vérifier lors de nos expériences.

Notons également que le problème que nous étudions ne possède pas une solution optimale unique. En fait, il y a un nombre relativement grand de solutions possibles avec sensiblement le même coût total. Dans ce contexte, l'interaction entre l'administration (le planificateur, l'analyste ou autres) et le modèle intégré dans un système informatique, prend une place importante dans le choix d'une solution parmi toutes celles dont les coûts totaux sont semblables, mais qu'on peut départager selon des critères non exprimés et souvent difficilement exprimables dans le modèle.

Ainsi donc, nous voyons plusieurs modes d'utilisation de notre méthode.

Dans un mode exploratoire, le modèle pourrait être utilisé pour rechercher des stratégies d'opération pour répondre, soit à des prévisions à plus long terme, soit à des possibles changements technologiques, économiques, ou dans la structure du système ferroviaire. Des structures différentes de réseau de service pourraient être étudiées et des coûts et des stratégies pourraient être produits très rapidement avec considérablement moins d'efforts que présentement.

Le système pourrait également être utilisé en mode opérationnel pour aider à l'établissement des politiques à être utilisées lors de la période suivante de planification. En débutant avec la solution actuelle, ou une autre solution initiale générée manuellement ou par moyen informatique, l'algorithme chercherait à l'améliorer par des modifications marginales.

Bien sûr, tel que mentionné précédemment, les diverses procédures peuvent être utilisées séparément, de façon modulaire, pour analyser diverses parties du système.

Un ensemble de procédures graphiques interactives doit aussi être prévu, pour faciliter l'interaction homme-système et aider à la manipulation et à la compréhension de la masse énorme d'informations générées par l'algorithme. Ainsi, notre méthode peut s'intégrer au processus de planification et l'aider

Remarquons finalement que notre méthode peut se généraliser (Crainic, 1984b) pour traiter des problèmes relatifs à d'autres types de transport des marchandises, lorsque c'est un même organisme qui planifie le cheminement des marchandises, ainsi qu'au moins une partie du réseau de service et/ou des opérations intermédiaires. Bien entendu, les formes particulières des termes de l'objectif, ainsi que la spécificité même de ses termes vont varier selon l'application étudiée (et donc des procédures de l'algorithme vont aussi être modifiées), mais l'approche et les principes généraux de modélisation et résolution restent les mêmes. Soulignons également, qu'avec les mêmes restrictions et les mêmes remarques que précédemment, notre approche est aussi particulièrement indiquée lorsque plusieurs modes de transport sont impliqués.

En conclusion, nous avons présenté une approche de modélisation et algorithmique qui peut contribuer efficacement et positivement au processus de planification tactique du transport ferroviaire des marchandises. Elle représente également une voie intéressante pour la construction d'outils d'aide à la planification du transport (multi-mode, multi-produits) de marchandises.

RÉFÉRENCES

ASSAD, A.A. (1980a), "Models for Rail Transportation", TRANSPORTATION RESEARCH A 14A, 205-220.

ASSAD, A.A. (1980b), "Models of Rail Networks : Toward a Routing/Make-Up Model", Transportation Research B 14B, 101-114.

BODIN, L.D., GOLDEN, B.L., SCHUSTER, A.D., ROWIG, W. (1980), "A Model for the Blocking of Trains", Transportation Research B 14B, 115-120.

COUTU, J.-Y. (1978), "Prédiction du trafic de wagons vides dans le réseau ferroviaire du C.N. à l'aide d'un modèle de gravité", publication #118, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

CRAINIC, T.G. (1982), "Un modèle de planification tactique pour le transport ferroviaire des marchandises", thèse de doctorat, département d'informatique et de recherche opérationnelle, Université de Montréal, publication #247, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

CRAINIC, T.G., FERLAND, J.A., ROUSSEAU, J.-M. (1984a), "A Tactical Planning Model for Rail Freight Transportation", à paraître dans Transportation Science.

CRAINIC, T.G., ROUSSEAU, J.-M. (1984b), "Multimode, Multicommodity Freight Transportation : A General Modelling Framework and Algorithmic Experience", Publication #332, Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

ELBROND, J. (1978), "A Method for the Calculation of the Capacity of a Single Track Railroad System", présenté au "Heavy Haul Railways Conference", Perth, Australie.

ENGLISH, G.W. (1977), "An Analytic Model for the Analysis of Single Track Railway Capacity", présenté au "International Symposium of Travel Supply Models", Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal.

FLORIAN, M., BUSHELL, G., FERLAND, J.A., GUÉRIN, G., NASTANSKY, L. (1976), "The Engine Scheduling Problem in a Railway Network", Infor 14,2, 121-138.

HANKS, N.A.R., KLEIN, R., KURAN, R.B., MOORE EDE, W.J. (1974), "Elements of Railway Route Capacity Analysis", rapport du C.N. Rail Exploitation.

LeBLANC, L.J. (1976), "Global Solutions for a Nonconvex, Nonconcave Rail Network Model", Management Science 23, 2, 131-139.

PETERSEN, E.R., FULLERTON, H.V., éditeurs (1975), "The Railcar Network Model", Report #75-11, CIGGT, Queen's University, Kingston, Canada.

PETERSEN, E.R. (1977a), "Railyard Modelling : Part I - Prediction of Putt-Through Time", Transportation Science 11, 1, 37-49.

PETERSEN, E.R. (1977b), "Railyard Modelling : Part II - The Effect of Yard Facilities on Congestion", Transportation Science 11, 1, 50-59.

THOMET, M.A. (1971a), "A Combinatorial Search Approach to the Freight Scheduling Problem", Ph.D. Thesis, Department of Electrical Engineering, Carnegie-Mellon University.

THOMET, M.A. (1971b), " A User-Oriented Freight Railroad Operating Policy", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-1, 4, 349-356.

TURNQUIST, M.A., DASKIN, M.S. (1981), "Queueing Models of Classification and Connection Delay in Railyards", Transportation Science 16, 1, 207-230.

POOR

QUALITY

ORIGINAL